DOI: 10.5846/stxb201603270551

吴未, 范诗薇, 欧名豪.基于网络效能分析的生境网络构建与优化——以苏锡常地区白鹭为例.生态学报,2017,37(11):3872-3880.

Wu W, Fan S W, Ou M H.A network efficiency analysis approach to habitat network optimization: a case study of the little egret (*Egretta garzetta*) in the Su-Xi-Chang area, China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3872-3880.

基于网络效能分析的生境网络构建与优化
——以苏锡常地区白鹭为例

吴 未[1,2,*], 范诗薇[1], 欧名豪[1,2]

1 南京农业大学土地管理学院,南京 210095

2 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心,南京 210095

摘要:从网络效能分析出发研究生境网络优化具有重要意义。以快速城市化苏锡常地区为小尺度研究区、苏锡常及周边 15 个城市为大尺度泛研究区、白鹭为焦点物种,通过采用引入并构建网络效能概念框架、识别和构建不同尺度生境网络、调整网络结构和转换网络结构特性相结合的方法,实现了跨尺度下白鹭生境网络优化。结果表明:1)依据大尺度迁移网络完善小尺度生境网络得到的方案一和改变方案一网络特性得到的方案二均是现状生境网络的优化方案;2)方案二与方案一相比,在平均路径长度值增加、聚类系数值减少、节点度概率分布幂次关系拟合度提高,即小世界特性减弱、无标度特性增强的基础上,测度网络连接度的 α、β、γ 指数值得到增加,同时新增生境节点和迁移廊道数量更少,具有更好的优化成效;3)从网络效能分析出发,有益于提高生境网络跨尺度下优化方案的可行性,其分析思路既丰富了网络优化的方法论研究,也为提高上位与下位规划空间契合度的实践提供了理论支持。但从网络效能概念框架看,如网络层级分析、其他尺度情景研究、网络质量测度指标等方面还亟待丰富与完善。

关键词:网络效能分析;生境网络优化;网络结构特征;尺度;白鹭;苏锡常地区

A network efficiency analysis approach to habitat network optimization: a case study of the little egret (*Egretta garzetta*) in the Su-Xi-Chang area, China

WU Wei[1,2,*], FAN Shiwei[1], OU Minghao[1,2]

1 *College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*

2 *National & Joint Local Engineering, Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation, Nanjing* 210095, *China*

Abstract: The network efficiency analysis method is used to study network systematization and integrity, which are important for the assessment of ecological networks. However, this method has rarely been applied in habitat network optimization studies. The objective of the present study was to use the network efficiency analysis method to develop a new approach to optimize habitat network analysis. A small-scale area of 1.75×10^5 km^2 was selected in the Su-Xi-Chang region as the case study; and 12 neighboring cities, together with the Su-Xi-Chang area, covering 11.91×10^5 km^2, were selected as the large-scale study area. The little egret (*Egretta garzetta*) was chosen as a regionally representative species in the study area. The method included three steps: 1) a conceptual framework for the network efficiency analysis was built to optimize the habitat network, in which the small-world and scale-free network concepts were introduced, with their network structural characteristics, which included average path length, cluster coefficients, and the probability distributions of node degrees. These structural characteristics were applied in step 3 as the assessment indicators; 2) the little egret habitat

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41571176);江苏高校哲学社会科学研究项目(2015SJD096);中央高校基本科研业务费人文社会科学研究基金配套项目(SKPT2015018)

收稿日期:2016-03-27; **网络出版日期**:2017-02-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ww@njau.edu.cn

patches and small- and large-scale habitat networks were identified and simulated. The present status of the small-scale habitat network was obtained from previous research results. In the large-scale area analysis, the observation sites were obtained from a dataset for 2003—2015 on the *China Bird Report* website. These were regarded as the habitats and those sites where > 20 little egrets were observed simultaneously were identified and transferred to habitat patches. Then, a large-scale habitat network was simulated using the same method used in the previous research; and 3) the present status of the small-scale habitat network was optimized using the large-scale habitat network and was designated as network A. Network B was generated by adjusting the network A structure and transferring its network structural characteristics. The network connectivity indexes α, β, and γ of the present status small-scale habitat network were used to calculate and compare networks A and B. The results showed that 1) the A and B networks represented the optimized results of the present status small-scale habitat network; 2) the increased average path length value, decreased cluster coefficient value, and increased goodness-of-fit of probability distribution of node degree for network B compared to that of network A showed that the network B small-world network characteristics had decreased, but its scale-free network characteristics had increased. This suggests that network B has a better fit to the large-scale habitat network than network A; and 3) the number of newly-added habitat nodes and the migration corridor for network B were smaller than network A, but its corresponding values for the network connectivity indexes α, β, and γ were greater. This suggests that network B results were better than those for network A, and therefore are the recommended, optimized results. The present study indicated that optimizing habitat networks using the network efficiency analysis method improved effectiveness, enriched network structure optimization methodology, and provided a theoretical basis for improved goodness-of-fit when undertaking spatial planning among upper- and lower-levels. However, further studies are required to improve conceptual frameworks, including aspects of network hierarchical analysis, scaling, and network quality assessment indicators.

Key Words: network efficiency analysis; habitat network optimization; network structure characteristics; scale; the little egret (*Egretta garzetta*); Su-Xi-Chang area

生境网络在保障物种在不同生境间的物质、能量和信息交流、遏制生境破碎化影响、提高生境质量[1]、支持物种长期存活[2]等方面具有重要意义。由于建设用地大规模扩张、土地集约化利用等人为因素[3],大量自然生境被侵占[4]、生境质量下降、数量减少[5-6],物种生境网络遭受破坏[7]、物种迁移受阻[8]。加强尤其是快速城市化地区的生境网络保护及其优化研究十分迫切。

生境网络优化研究目前虽然涉及了不同的尺度[9-12],但主要探讨了单一尺度下物种的生态过程及其对环境短期变化的反应;较少涉及多尺度或跨尺度情景。但是物种栖息地的空间连续性、迁移范围广等特征决定了多尺度或跨尺度情景下生境网络优化研究的必要性和紧迫性[13]。事实上,对于不同尺度的生境网络,不进行网络的系统性考虑,不从整体性上实现网络连通,大尺度的生境网络很难在小尺度上得到落实,同时小尺度的生境网络也很难在大尺度上得到体现和获得应有的保护。将注重系统性、整体性的网络效能分析方法[14]引入研究,丰富了网络多尺度或跨尺度优化的思路,提高了网络优化方案的可行性,其方法有益于拓展网络优化研究视角,得到众多学者的广泛关注[14-15]。

1991 年 Patten 提出了生态网络效能概念[14],之后 Fath 和 Patten 等进行了深入研究[16-17],目前国内已将之应用到生态网络评价研究[18-20]并构建出相应的评价框架[18-19],但鲜有涉及生境网络研究,亟待检验应用。

本文以快速城市化苏锡常地区为研究区域、白鹭(*Egretta garzetta*)为焦点物种,通过采用引入并构建网络效能概念框架、识别和构建不同尺度生境网络、调整网络结构和转换网络结构特性相结合的方法,实现了跨尺度情景白鹭生境网络优化。本文着眼于生态学与网络拓扑相结合的方法,回答如何运用网络效能分析方法优化跨尺度生境网络?网络效能分析方法在网络优化研究中的作用和意义是什么等问题,以期拓展生境网络优化方法论的研究。

1 研究方法

1.1 研究区概况

苏锡常地区位于江苏南部太湖之滨,总面积 1.75 万 km^2,水域面积占 32.5%。地区以江苏约 17%的国土面积和人口,实现了约 40%的 GDP 和地方财政收入。截止 2015 年区内共有国家森林公园 7 个、国家湿地公园 2 个、省级自然保护区 3 个和县级自然保护区 1 个。地区周边还有固城湖自然保护区、汤山方山国家地质公园、宝华山自然保护区、镇江三山风景名胜区、长江豚类自然保护区等其它重要自然遗产地[21]。论文设定苏锡常 3 市及邻近 12 个城市包括沪通盐泰扬镇宁宣杭嘉湖绍等为泛研究区,总面积 11.91 万 km^2。

中国在世界候鸟迁徙中发挥着重大作用[22]。其中纵贯浙沪苏鲁津冀辽等地区的东部通道,为南北候鸟尤其是湿地水鸟的迁徙提供了重要繁殖地、停歇地和越冬地[23]。近 20 年来,农用地的减少、建设用地的增加以及生态环境质量的下降[24],致使生境破碎化趋势加剧。2000—2010 年研究区内焦点物种白鹭的适宜生境及生境网络遭到了严重破坏[25]。

1.2 数据处理

数据主要包括中国科学院国际科学数据服务平台 2010 年 TM 遥感数据、1:5 万数字高程 DEM 数据(30 m ×30 m)、2010 年全国县(市)行政区划图以及中国观鸟记录中心 2003—2015 年观测数据。TM 影像经解译得到土地利用/覆被数据,结合白鹭生境特点和数据精度,在 ArcGIS 10.0 中将区内土地划分为水田、旱地、园地、乔木林地、灌木林地、草地、城乡建设用地、交通用地、滩涂沼泽、湖泊水库、河流、沟渠/运河和其他未利用地 13 类。

1.3 研究思路与步骤

1.3.1 网络效能分析与研究思路

效能是指达到目标的程度,强调质量[26],可以通过不同的准则实现度量[18]。网络效能是一种空间效能[19],强调因网络结构特征变化而带来的网络质量变化。从网络效能出发研究生境网络优化问题,就是采用生境网络结构特征变化带来生境网络质量变化的思路和方法实现优化网络的目的。不同情景生境网络优化时采用的网络效能分析思路和方法是不同的。跨尺度生境网络优化情景中网络效能分析,思路上更加关注生境网络随尺度外推或在邻近尺度之间转换时的变化情况及由此对生境网络质量带来的影响;方法上更加强调对生境网络结构尺度变化特征分析,可以采用如生态过程跨尺度变化、特征参数空间变化、生态模型尺度转换[27]等方法。

网络是一个复杂的结构体系,通常从简单的规则网络逐步发育为复杂的小世界网络、随机网络等[27]。网络结构特征分析通常包括整体网络结构分析、中心性分析、块模型分析 3 个方面。整体网络结构分析包括网络密度、网络关联度、网络等级、网络效率等;中心性分析包括中心度、中介中心度、接近中心度等;块模型分析包括空间聚类分析等。不同网络之间比较时需要依据网络发育情况选择适宜网络结构特征指标。已有成果表明,小尺度生境网络多倾向于小世界网络[12]、大尺度生境网络多倾向于无标度网络。跨尺度生境网络优化情景中尺度变化问题就成为不同尺度网络相互转化问题。小世界网络和无标度网络作为 2 类最典型的复杂网络[28],两者相比,无标度网络具有更好的空间效能[20]。尺度上推过程中,跨尺度生境网络优化情景的研究思路是实现研究区生境网络小世界网络特性减弱的同时增强无标度网络特性,尺度下推过程反之亦然;研究方法可采用特征参数空间变化分析法考察小世界网络和无标度网络的网络结构特征量变化情况。

生境网络质量目前尚没有明确定义。研究表明影响(生境)网络质量的因素大致包括两类[29-31]:一是网络构成要素质量如生境斑块/节点、歇脚石、潜在迁移廊道等;二是网络结构特征如网络连接度、网络闭合度、网眼密度等。跨尺度生境网络情景中网络构成要素没有发生变化,因此网络结构特征是考察重点。

本文设定研究区为小尺度、泛研究区为大尺度,焦点物种迁移活动从研究区到泛研究区为跨尺度过程。该情景生境网络优化思路及步骤包括:1)分别构建研究区小尺度生境网络和泛研究区大尺度迁移网络;2)比

照两种尺度生境网络,对小尺度生境网络增补必要生境节点和迁移廊道得到方案一;3)测度方案一小世界网络和无标度网络结构特征量,并以此为依据对方案一网络结构进行调整得到方案二;4)评价研究区生境网络优化结果。

1.3.2　两种生境网络构建

研究区白鹭小尺度生境网络构建参照已有成果[12]采用最小成本路径法实现。

泛研究区白鹭大尺度迁移网络构建步骤为:1)采用生境斑块约束条件模型[25]与重要观测点(中国观鸟记录中心观测数量不少于20只的观测点)相结合的方法识别出重要生境斑块并转化为生境节点。为方便研究,将重要观测点划分为400只以上、100—400只之间、20—100只之间3个等级。2)采用不受觅食半径约束的直线连接法[12]模拟潜在迁移廊道。

1.3.3　小尺度生境网络增补

我国境内有2条白鹭长距离的南北向迁徙路线:南向路线,始于日本福冈,经横跨东海,到上海南汇、浙江嘉兴地区终止;北向路线,始于中国香港,经粤闽浙皖苏等省,到江苏盐城地区终止[22]。上述2条迁徙路线均在泛研究区范围内,本文主要讨论研究区北向路线。增补内容包括:1)与大尺度迁移网络比照,识别出小尺度生境网络中必需但缺失的A类生境节点和A类迁移廊道;2)采用白鹭10 km最大觅食半径[32]与生境斑块约束条件模型相结合的方法识别出A类迁移廊道中必需但缺失的踏脚石并转换为B类生境节点;3)采用受最大觅食半径约束的直线法[25]识别连接现有生境节点、A、B类生境节点的B类迁移廊道;4)将A、B类生境节点和迁移廊道增补到研究区小尺度生境网络中,得到方案一。

1.3.4　网络结构特征量测度和网络结构调整

测度方案一的网络结构特征量。网络结构特征量是检验网络小世界特性或无标度特性的常用标准。与相应随机网络相比一般认为,同时兼具较小平均路径长度和较大聚类系数的网络为小世界网络[33]、节点度满足幂律分布的网络为无标度网络[34]。本文选取平均路径长度、聚类系数和节点度概率分布特征为小世界网络和无标度网络的网络结构特征量[35](表1)。

表1　网络结构特征量表达式及意义

Table 1　The formulas and significance of network structure characteristics

网络结构特征量 Network structure characteristic	表达式(1) Formula	物理学意义 Physical significance	生态学意义 Ecological significance
平均路径长度 Average path length	$L = \frac{2}{n(n-1)}\sum_{i=j} d_{ij}$	反映网络节点间通信有效性	反映生境网络节点间物质及信息传递的有效性
聚类系数 Clustering coefficient	$C = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i$,其中 $C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$	反映网络集团化程度	反映生境网络中的局部连接程度
节点度概率分布特征 Probability distribution of node degree	$p(k) = \frac{n_k}{N}$	反映网络系统宏观统计特征	反映生境网络的成长性

(1)表达式中,i,j分别为网络节点,N为节点总数,L为平均路径长度,C为聚类系数,a_{ij}为任意两个节点i和j的连接边,d_{ij}为节点i到节点j的距离,k_i为节点度,E_i为在由节点i的k_i个临近节点构成的子网中实际存在的边数,$p(k)$为网络中节点度概率分布函数

依据网络结构特征量测度结果调整方案一网络结构,使之平均路径长度增加、聚类系数减小的同时生境节点度概率分布拟合曲线幂次关系拟合度提高,即减弱方案一小世界网络结构特性同时增强无标度网络结构特性,得到方案二。以上步骤在ArcGIS 10.0中完成。

1.3.5　网络优化结果评价

选用测度网络连接度的α、β、γ指数对优化结果进行评价[25]。

2　研究结果

2.1　泛研究区大尺度迁移网络

图1为泛研究区91个白鹭重要观测点(生境节点)降序排列情况。其中,一级节点6个分布在沪杭湖镇

盐5市,盐城2个(大丰、垛梁河口);杭州萧山围垦区1000只最多、镇江句容800只次之。二级节点19个,除宣杭绍嘉扬5市外其余10市均有,沪通盐各有3个。三级节点66个,15市内均有分布。

图2为按照1.3.3节迁徙路线绘制的白鹭泛研究区迁移方向示意图。南向路线在上海境内由3个二级和1个一级生境节点构成;北向路线主要由一级生境节点沿"杭湖—镇/通—盐"方向包括多条迁移路径构成,形成了以一级生境节点为集聚中心、二三级生境节点为辅的迁移网络骨架(图3)。

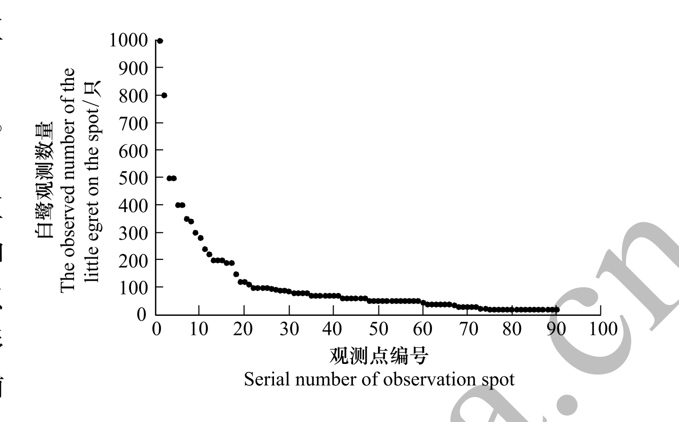


图1 白鹭观测数量不少于20只的生境节点排序情况

Fig.1 The number ranking of observation spots where over 20 little egrets have been eye-witted

2.2 研究区生境网络方案一

图4为研究区白鹭现状生境网络。图5、图6为按照1.3.3节方法对白鹭生境网络进行优化的中间过程图。图5中A类生境节点(红色)17个、A类迁移廊道(绿色)32条,其中11个生境节点与现状生境网络距离较远,与多数A类迁移廊道共同起着连接研究区生境网络和泛研究区迁移网络的重要"桥接"作用;但是多数A类迁移廊道直线距离超出10 km最大觅食半径需要增设踏脚石(B类生境节点)和B类迁移廊道。图6中B类生境节点(紫色)90个和B类迁移廊道(紫色,包括与A类迁移廊道重叠部分)186条,它们的增设提升了图5中生境网络密度并降低了目标物种迁移难度。

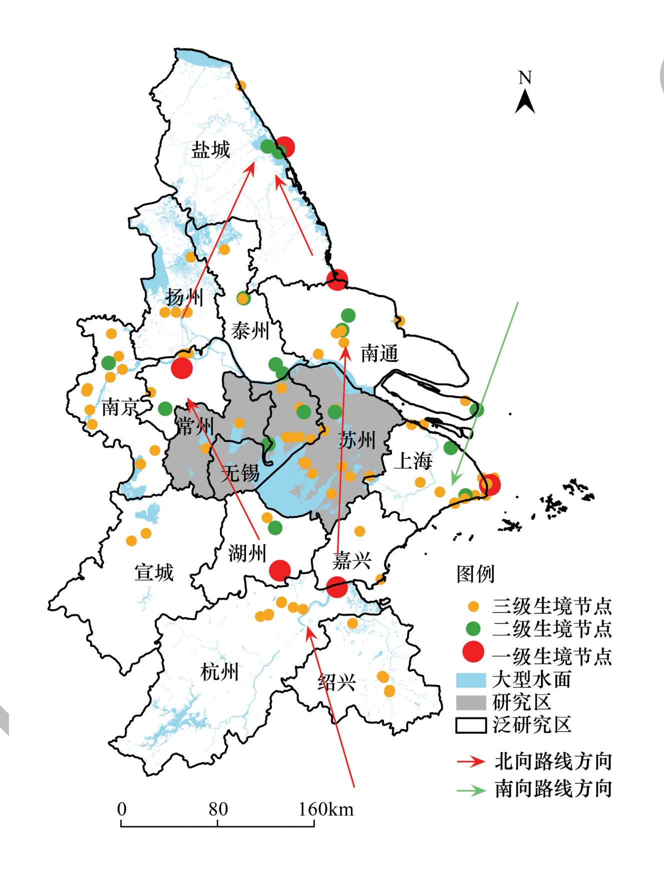


图2 泛研究区内白鹭迁移方向示意图

Fig.2 The direction of migration of the little egret of pan-study area

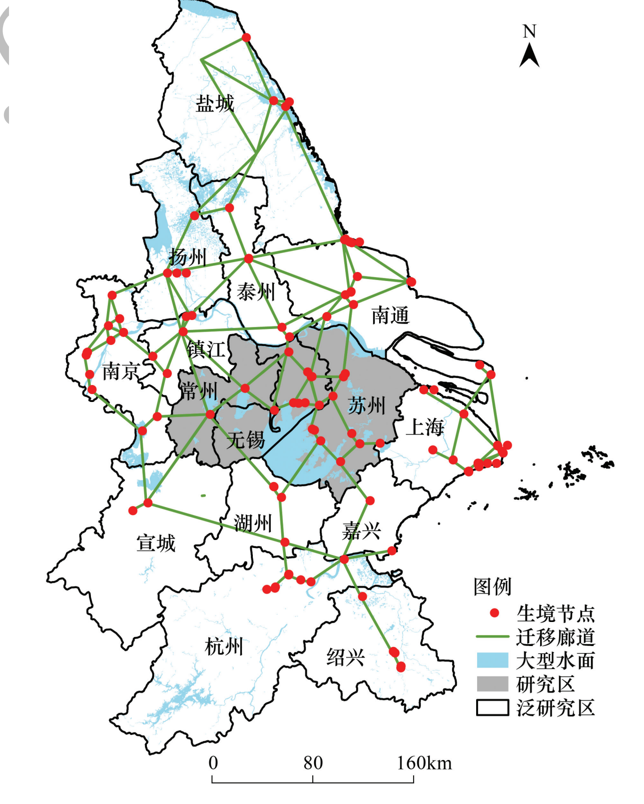


图3 泛研究区内白鹭大尺度迁移网络

Fig.3 The network of the little egret's migration of pan-study area

图 7 为图 5 和图 6 最终叠加结果即方案一。与图 4 相比,方案一所示研究区生境网络更能体现出白鹭整体向北迁移、群体数量庞大、栖息地分散、觅食时不结群等种群特征和生态过程。

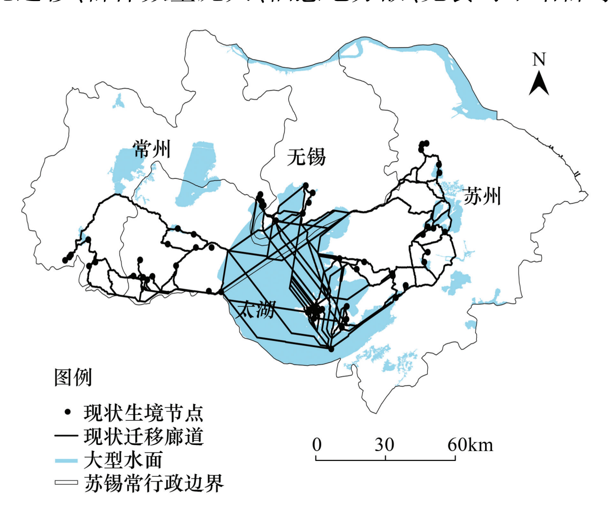


图 4　研究区白鹭现状生境网络

Fig.4　The current habitat network of the little egret of the study area

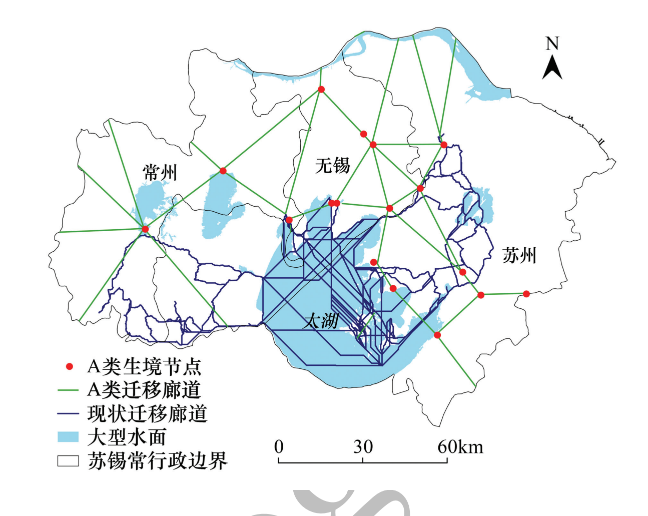


图 5　研究区 A 类生境节点和迁移廊道识别结果

Fig.5　The distribution of habitat nodes and corridors of Type A of the study area

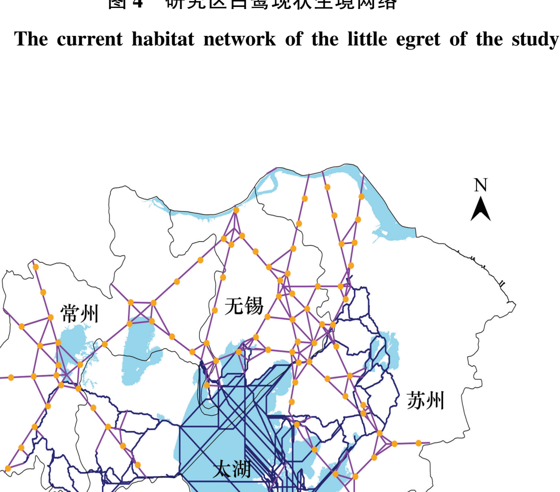


图 6　研究区 B 类生境节点和迁移廊道识别结果

Fig.6　The distribution of habitat nodes and corridors of Type B of the study area

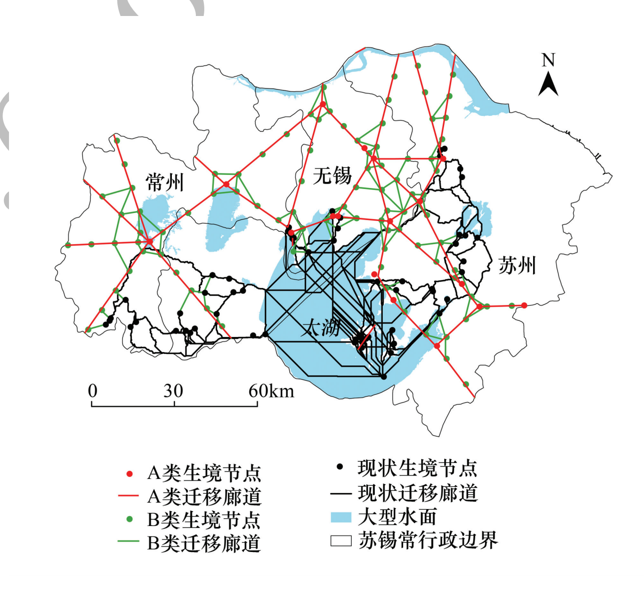


图 7　研究区生境网络优化方案一

Fig.7　The habitat network optimization result of the study area: Scenario1

2.3　研究区生境网络方案二

图 8 为按照 1.3.4 节方法对方案一进行调整后得到的研究区生境网络方案二。

表 2 和图 9 分别为方案一和方案二的网络结构特征量测度结果。如表 2 所示,方案二与方案一相比,平均路径长度增加了 19.73%、聚类系数减少了 31.21%,表明方案二小世界网络结构特性得到较明显减弱。图 9 中 S_1、S_2分别为方案一、方案二生境节点度概率分布拟合曲线。S_1拟合幂函数为 $y_1=0.5143x_1^{-1.399}$、相关系数 $R_1^2=0.8804$,S_2拟合幂函数为 $y_2=0.6478x_2^{-1.818}$、相关系数 $R_2^2=0.9793$。拟合曲线 S_1 和 S_2 均符合幂率分布,但 S_2的幂次关系拟合度高于 S_1,即 $R_2^2>R_1^2$,表明方案二无标度网络结构特性优于方案一。以上说明,由方案一调

整得到的方案二实现了 1.3.1 节研究思路中网络结构调整的预期目标。

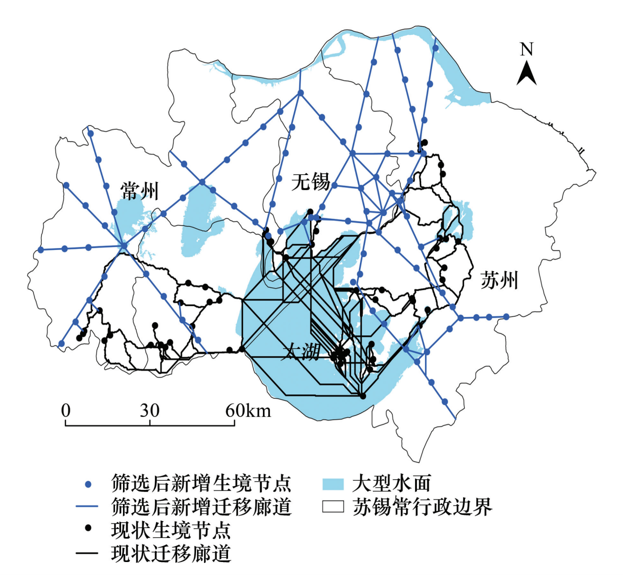


图 8 研究区生境网络优化方案二

Fig.8 The habitat network optimization result of the study area: Scenario2

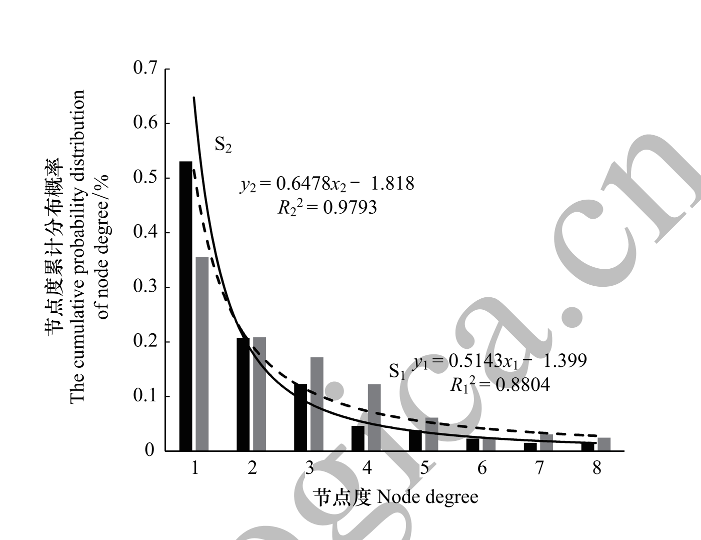


图 9 方案一与方案二的节点度概率分布拟合曲线

Fig.9 The curves of node degree's distribution probability of Scenario 1 and Scenario 2

表 2 不同方案下生境网络的小世界网络结构特征量变化情况

Table 2 The results of exploring complex network structure characteristics of habitat network in different scenarios

生境网络 Habitat networks	平均路径长度/km Average path length	聚类系数 Clustering coefficient
现状 The current status	0.652	0.669
方案一 Scenario 1	0.674	0.612
方案二 Scenario 2	0.807	0.421

2.4 优化结果评价

表 3 为现状生境网络、方案一、方案二的网络结构指数情况。1）方案一、方案二与现状生境网络相比，生境节点和廊道数量均有增加，对应的 3 个连接度指数值也变大了，表明方案一、方案二均为现状生境网络的优化方案。2）方案二新增生境节点和廊道数量与方案一相比数值均较小、但对应的 3 个网络结构指数值均较大，说明方案二较方案一优化成效更显著，为推荐方案。3）方案二中新增生境节点 72 个，对应生境斑块面积在 10—100 hm^2，以乔木林地、沼泽滩涂、湖泊水库为主，包括部分水田，符合生境地类要求，主要在常州长荡湖和滆湖、无锡漕湖和江阴望山湖、苏州昆承湖和澄湖等地，均为易恢复的生境斑块。

表 3 不同方案下生境网络结构指数变化情况

Table 3 The results of network structure indexes of habitat network in different scenarios

生境网络 Habitat network	节点数/个 Number of nodes	廊道数/条 Number of corridors	α 指数值 α index	β 指数值 β index	γ 指数值 γ index
现状 The current status	58	109	0.468	1.879	0.649
方案一 Scenario 1	165	327	0.502	1.982	0.669
方案二 Scenario 2	130	261	0.518	2.008	0.680

以上说明，跨尺度情景下基于网络效能分析的生境网络优化，可以通过采用识别和增补小尺度生境网络在大尺度迁移网络中缺失的生境节点、迁移廊道和踏脚石的方法得以实现。在此基础上，依据网络结构特征参数空间变化，对小尺度生境网络向大尺度迁移网络进行网络结构特征转换，网络优化成效会得到进一步

提升。

3　结论与讨论

基于网络效能分析思路和方法,实现了跨尺度情景白鹭生境网络优化。结果表明:1)依据大尺度迁移网络增补小尺度生境网络得到的方案一和改变方案一网络特性得到的方案二均是现状生境网络的优化方案;2)方案二与方案一相比,网络结构特征在实现减弱小世界特性、增强无标度特性调整预期目标的同时新增生境节点和迁移廊道数量更少、网络连接度数值更大,说明优化成效更好。反映出调整网络结构比单纯增补生境节点和迁移廊道对生境网络优化结果影响更显著。3)从网络效能分析出发优化生境网络,使得生境网络及其保护在上位规划与下位规划中实现了较高的契合度,换言之,既保证了下位规划在上位规划中得到充分体现的同时,也实现了上位规划在下位规划中得到精准执行,切实提高了生境网络跨尺度情景优化方案的可行性。该分析思路既拓展了网络优化研究方法论,也为各类空间规划政策制定和行政管理实践提供了理论支持。

网络效能分析在不同情景生境网络优化中的思路和方法是不同的。就本情景而言,还应在以下 3 个方深入探讨:1)强化网络整体与子网的关系,丰富网络层级[35]分析;2)完善尺度研究如物种尺度、时间尺度、空间尺度等情景[36-37];3)拓展网络质量测度指标,如能量流的数量分析方法[14,38]、承载力指标[39]等。

如前所述,网络质量目前尚无明确定义,其测度方法及量化指标也亟待提出和验证。网络效能一方面理论研究发展较为迅速,但共识与分歧并存;另一方面应用研究相对滞后,实践与检验尚处于起步阶段。网络效能与网络质量都关注网络,必然存在一定逻辑关系,但内在机理仍有待深入探讨。

文中白鹭生境网络的构建是通过采用两种方法实现的,这既是已有成果[12]的延续,也是基于“白鹭大尺度长距离迁移以空中飞行为主、小尺度短距离扩散以行走与飞行相结合为主”的生物习性考虑,但相关应用研究较少还有待检验。

图 2 中一级生境节点“湖州—镇江—大丰”、“杭州—垛梁河口—大丰”、“镇江—垛梁河口”间的直线距离均在 200—300 km 具有一定规律性;一级生境节点分布较稀疏地区如苏锡常地区,二级生境节点分布较密集,其成因值得探讨。

参考文献(References):

[1] Jongman R H G, Bouwma I M, Griffioen A, Jones-Walters L, Van Doorn A M. The pan European ecological network: PEEN. Landscape Ecology, 2011, 26(3): 311-326.

[2] Bruinderink G G, Van Der Sluis T, Lammertsma D, Opdam P, Pouwels R. Designing a coherent ecological network for large mammals in northwestern Europe. Conservation Biology, 2003, 17(2): 549-557.

[3] Pouzols F M, Toivonen T, Di Minin E, Kukkala A S, Kullberg P, Kuusterä J, Lehtomäki J, Tenkanen H, Verburg P H, Moilanen A. Global protected area expansion is compromised by projected land-use and parochialism. Nature, 2014, 516(7531): 383-386.

[4] Fernández-Juricic E. Bird community composition patterns in urban parks of Madrid: the role of age, size and isolation. Ecological Research, 2000, 15(4): 373-383.

[5] York A M, Shrestha M K, Boone C G, Zhang S N, Harrington Jr J A, Prebyl T J, Swann A, Agar M, Antolin M F, Nolen B, Wright J B, Skaggs R. Land fragmentation under rapid urbanization: a cross-site analysis of Southwestern cities. Urban Ecosystems, 2011, 14(3): 429-455.

[6] Shrestha M K, York A M, Boone C G, Zhang S N. Land fragmentation due to rapid urbanization in the Phoenix Metropolitan Area: analyzing the spatiotemporal patterns and drivers. Applied Geography, 2012, 32(2): 522-531.

[7] Bradley C A, Altizer S. Urbanization and the ecology of wildlife diseases. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(2): 95-102.

[8] Opdam P, Wascher D. Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. Biological Conservation, 2004, 117(3): 285-297.

[9] 胡望舒, 王思思, 李迪华. 基于焦点物种的北京市生物保护安全格局规划. 生态学报, 2010, 30(16): 4266-4276.

[10] Zetterberg A, Mörtberg U M, Balfors B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(4): 181-191.

[11] Rubio L, Saura S. Assessing the importance of individual habitat patches as irreplaceable connecting elements: an analysis of simulated and real landscape data. Ecological Complexity, 2012, 11: 28-37.

[12] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 基于不同网络构建方法的生境网络优化研究——以苏锡常地区白鹭为例. 生态学报, 2016, 36(3): 844-853.

[13] 赵振斌, 赵洪峰, 田先华, 延军平. 多尺度结合的西安市浐灞河湿地水鸟生境保护规划. 生态学报, 2008, 28(9): 4494-4500.

[14] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.

[15] Yang T X, Jing D, Wang S B. Applying and exploring a new modeling approach of functional connectivity regarding ecological network: a case study on the dynamic lines of space syntax. Ecological Modelling, 2015, 318: 126-137.

[16] Fath B D, Patten B C. Network synergism: emergence of positive relations in ecological systems. Ecological Modelling, 1998, 107(2/3): 127-143.

[17] Fath B D. Network mutualism: positive community-level relations in ecosystems. Ecological Modelling, 2007, 208(1): 56-67.

[18] 刘滨谊, 吴敏. 基于空间效能的城市绿地生态网络空间系统及其评价指标. 中国园林, 2014, 30(8): 46-50.

[19] 刘滨谊, 吴敏. "网络效能"与城市绿地生态网络空间格局形态的关联分析. 中国园林, 2012, 28(10): 66-70.

[20] 陈剑阳, 尹海伟, 孔繁花, 幺贵鹏. 环太湖复合型生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(9): 3113-3123.

[21] 谢慧玮, 周年兴, 关健. 江苏省自然遗产地生态网络的构建与优化. 生态学报, 2014, 34(22): 6692-6700.

[22] 张孚允, 杨若莉. 中国鸟类迁徙研究. 北京: 中国林业出版社, 1997: 133-152.

[23] 张孚允. 中国候鸟环志的研究. 生物多样性, 1994, 2(1): 16-20.

[24] 许妍, 高俊峰, 郭建科. 太湖流域生态风险评价. 生态学报, 2013, 33(9): 2896-2906.

[25] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4897-4906.

[26] 杨眉, 王云才. 绿地生态效能研究中几个相近词汇的辨析. 中国城市林业, 2014, 12(1): 5-7, 51-51.

[27] 高中华, 李满春, 陈振杰, 李飞雪, 孙电. 城市道路网络的小世界特征研究. 地理与地理信息科学, 2007, 23(4): 97-101.

[28] 杜海峰, 李树茁, Marcus W F, 悦中山, 杨绪松. 小世界网络与无标度网络的社区结构研究. 物理学报, 2007, 56(12): 6886-6893.

[29] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. Landscape and Urban Planning, 2002, 58(2/4): 269-280.

[30] Jordán F, Báldi A, Orci K M, Rácz I, Varga Z. Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a *Pholidoptera transsylvanica* (Orthoptera) metapopulation. Landscape Ecology, 2003, 18(1): 83-92.

[31] Foltête J, Clauzel C, Vuidel G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. Environmental Modeling & Software, 2012, 38: 316-327.

[32] Correa Ayram C A, Mendoza M E, Pérez Salicrup D R, López Granados E. Identifying potential conservation areas in the Cuitzeo Lake basin, Mexico by multitemporal analysis of landscape connectivity. Journal for Nature Conservation, 2014, 22(5): 424-435.

[33] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.

[34] Barabási A L. Scale-free networks: a decade and beyond. Science, 2009, 325(5939): 412-413.

[35] 吴康, 方创琳, 赵渺希. 中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征. 地理研究, 2015, 34(4): 711-728.

[36] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价. 地理研究, 2009, 28(2): 284-292.

[37] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303-314.

[38] 李中才, 席旭东, 高琴, 李莉鸿. 基于输入-输出流分析的生态网络 φ 模式能流、ρ 模式能流测度方法. 生态学报, 2011, 31(19): 5860-5864.

[39] 王开运, 邹春静, 孔正红, 王天厚, 陈小勇. 生态承载力与崇明岛生态建设. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2447-2453.